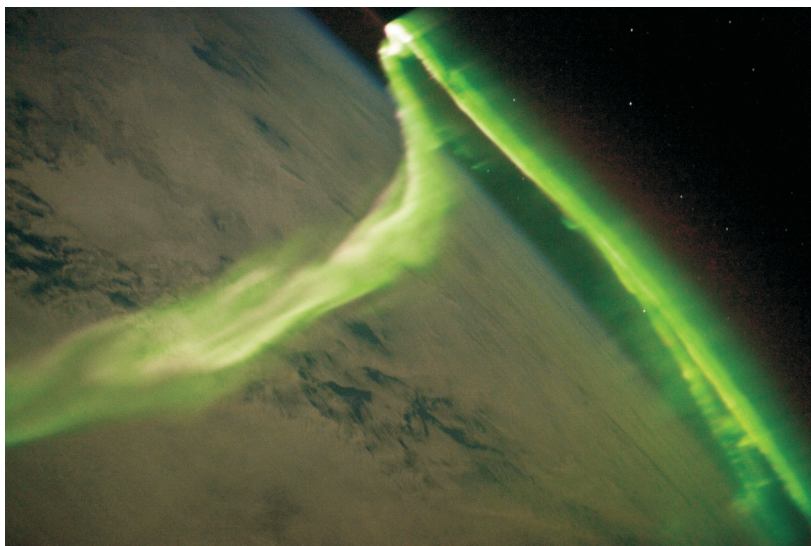


Butelka magnetyczna, czyli o tym, jak uwięzić naładowane cząsteczki

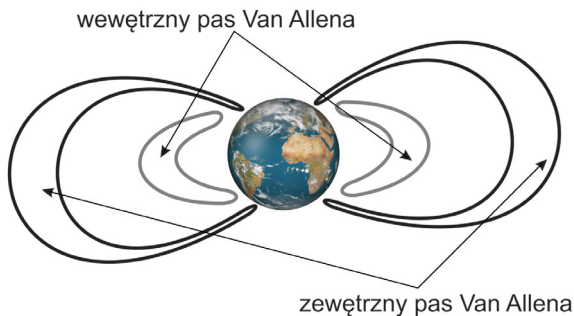
Każdy z czytelników widział kiedyś z pewnością zdjęcia zorzy polarnej. Przepiękne wielobarwne kurtyny falujące na niebie w czasie trwania tego zjawiska wywierają niezapomniane wrażenie. Dlaczego jednak obserwuje się je jedynie na dalekiej północy? Dlaczego mieszkańcy Zakopanego czy nawet Szczecina są pozbawieni tego wyjątkowego spektaklu?



Zdjęcie zorzy polarnej wykonane z pokładu międzynarodowej stacji kosmicznej

Okazuje się, że czasami zorzę polarną można zaobserwować również na niższych szerokościach geograficznych, jednak nie zwiastuje to niczego dobrego. Przykładowo, w pierwszych dniach września 1859 roku zorze polarne można było podziwiać nawet w Rzymie, na Kubie i na Hawajach, ale towarzyszyły im również liczne pożary będące skutkiem spięć na liniach telegraficznych. Zorze polarne daleko od biegunów są bowiem świadectwem tzw. **burz magnetycznych**, które są skutkiem gwałtownych procesów zachodzących od czasu do czasu na Słońcu. Nawet w okresach normalnej aktywności Słońca w każdej sekundzie w pobliżu Ziemi docierają miliardy bardzo szybkich, naładowanych cząstek. Strumień tych cząstek nosi nazwę **wiatru słonecznego**. Podczas burz magnetycznych intensywność wiatru słonecznego gwałtownie wzrasta.

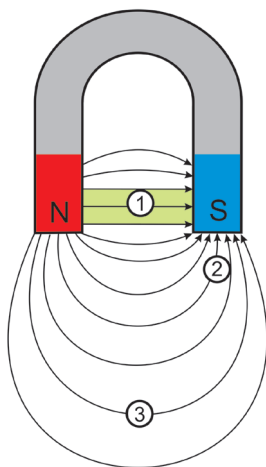
Cząsteczki wchodzące w skład wiatru słonecznego są bardzo szkodliwe dla żywych organizmów. Po wnikięciu do wnętrza ciała, uszkadzają one bowiem komórki tworzące tkanki i narządy. Na szczęście Ziemia posiada naturalny system zabezpieczeń przed wiatrem słonecznym w postaci tzw. **magnetosfery** (rys. 1). System ten zawdzięcza swoje istnienie ziemskiemu polu magnetycznemu. Dzięki niemu wokół Ziemi rozciąga się obszar (zwany **pasami Van Allena**), w którym cząsteczki wiatru słonecznego zostają uwięzione i dzięki temu nie docierają do powierzchni Ziemi.



Rys. 1. Ziemska magnetosfera z zaznaczonymi pasami Van Allena

Żeby dobrze zrozumieć, w jaki sposób dochodzi do uwięzienia cząstek wiatru słonecznego w ziemskiej magnetosferze, przyjrzyjmy się, w jaki sposób pole magnetyczne wpływa na ruch naładowanych cząstek.

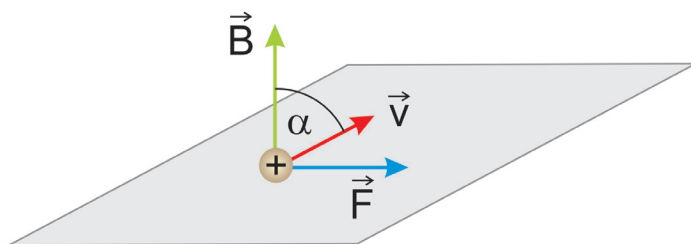
Założmy na początek, że mamy do czynienia z jednorodnym polem magnetycznym, na przykład takim, jakie istnieje pomiędzy biegunami magnesu w kształcie podkowy.



Rys. 2. Pole magnetyczne magnesu stałego. Zielonym kolorem zaznaczono obszar pola jednorodnego

Pole magnetyczne przedstawia się za pomocą linii zwanych **liniami pola**. Linie te wskazują kierunek i zwrot wektora indukcji magnetycznej (\vec{B}) w każdym jego punkcie. Tam, gdzie pole jest jednorodne linie te mają postać równoległych prostych ułożonych w jednakowych odstępach (obszar 1 na rys. 2). W przypadku niejednorodnego pola magnetycznego gęstość linii świadczy o intensywności pola w danym miejscu: tam gdzie linie leżą blisko siebie (obszar 2) pole ma większe natężenie niż w miejscach, gdzie odstępy między liniami są większe (obszar 3).

Jeśli w obszar pola magnetycznego wpuścimy naładowaną cząstkę to będzie na nią działać siła zwana **siłą Lorentza** (rys. 3). Siła ta jest zawsze prostopadła do kierunku ruchu cząstki i kierunku indukcji pola magnetycznego. W jaki sposób siła ta wpływa na ruch cząstki? Wyobraźmy sobie, że razem z cząstką wpadamy z prędkością \vec{v} w obszar pola magnetycznego o indukcji \vec{B} skierowanej pionowo ku górze. Siła Lorentza będzie w tym wypadku skierowana poziomo, a jej zwrot będzie zależał od znaku ładunku: cząstka dodatnia będzie ściągana na prawo, a cząstka ujemna – na lewo. Ponieważ siła Lorentza jest zawsze prostopadła do wektora prędkości, to cząstka pod wpływem tej siły będzie coraz bardziej zbacać z pierwotnego kursu, poruszając się po torze kołowym w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku pola magnetycznego. Promień zataczanego okręgu będzie tym mniejszy, im większa będzie indukcja pola magnetycznego.



Rys. 3. Siła Lorentza działająca na cząstkę o ładunku dodatnim w pionowym polu magnetycznym skierowanym ku górze

Wartość siły Lorentza można wyliczyć z następującego wzoru:

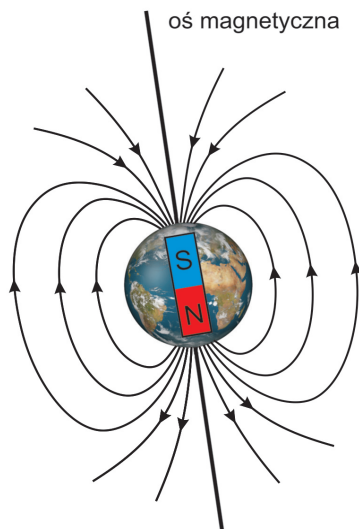
$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha,$$

gdzie q oznacza ładunek cząstki, a α to kąt między kierunkiem prędkości a kierunkiem indukcji pola magnetycznego. Możemy z tego wynioskować, że jeśli cząstka wpadnie w obszar pola magnetycznego równoległe do linii pola ($\alpha = 0^\circ$, $\sin \alpha = 0$), to siła Lorentza będzie w tym wypadku równa zero i tor cząstki nie ulegnie zmianie. Natomiast największa możliwa siła będzie działać na cząstkę wpadającą w obszar pola pod kątem prostym ($\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$). Dla dowolnego kąta zawartego pomiędzy tymi dwoma skrajnościami ruch cząstki będzie złożeniem ruchu prostoliniowego z ruchem po okręgu, co w efekcie daje tor o kształcie linii śrubowej (rys. 4).



Rys. 4. Ruch cząstki naładowanej po torze śrubowym w polu magnetycznym

Wróćmy teraz do naładowanych cząstek wpadającego w obszar ziemskiego pola magnetycznego. Pole ziemskie ma w przybliżeniu kształt pola magnesu sztabkowego i skierowane jest z południa na północ (rys. 5).



Rys. 5. Pole magnetyczne Ziemi

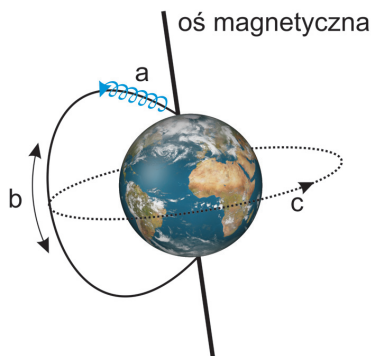
Cząsteczki wiatru słonecznego trafiające w obszar tego pola zostają uwięzione w tzw. **pasach radiacyjnych** (pasach Van Allena). Wyróżnia się przy tym pas zewnętrzny, rozciągający się w odległości od około 12 000 do 60 000 km nad powierzchnią Ziemi, oraz pas wewnętrzny zajmujący obszar od wysokości około 600 km do 6000 km. Pomiedzy tymi pasami znajduje się obszar względnie pozbawiony cząstek i to właśnie tam umieszcza się zwykle sondy kosmiczne oraz satelity. Cząsteczki wiatru słonecznego zostają uwięzione w zewnętrznym pasie Van Allena. Natomiast cząstki wchodzące w skład pasa wewnętrznego są produktami reakcji zachodzących pomiędzy promieniowaniem kosmicznym i ziemską atmosferą.

W zależności od energii, masy oraz ładunku cząstki zajmują różne obszary w pasach radiacyjnych. Jednak wszystkie one poruszają się w podobny sposób. Dla przykładu zajmiemy się analizą ruchu elektronu o szybkości kilkudziesięciu tysięcy kilometrów na sekundę. Ponieważ kierunek, pod jakim wpada on w obszar ziemskiego pola magnetycznego jest dowolny, jego ruch można opisać jako złożenie dwóch ruchów: ruchu śrubowego wokół linii ziemskiego pola magnetycznego oraz powolnego dryftu dookoła Ziemi (rys. 6).

Śrubowa trajektoria wynika z działania siły Lorentza – na skutek tego elektron porusza się po okręgu o promieniu rzędu kilometra, jednocześnie przemieszczając się wzdłuż linii pola pomiędzy ziemskimi biegunami geomagnetycznymi. Ale co dzieje się po tym jak cząstka dotrze w pobliże bieguna? Otóż na wysokości około 300 km nad powierzchnią Ziemi elektron ulega wyhamowaniu, po czym zmienia kierunek ruchu, podążając w kierunku przeciwnego bieguna. Dzieje się tak dlatego, że ziemskie pole magnetyczne nie jest jednorodne. Im bliżej bieguna, tym linie pola stają się gęstsze i przemieszczający się w takim niejednorodnym obszarze elektron doświadcza działania dodatkowej siły. Siła ta wypycha cząstkę w kierunku bardziej jednorodnego pola magnetycznego, a więc z dala od bieguna. Zjawisko to nosi nazwę **efektu zwierciadła magnetycznego**. Na skutek „magnetycznego odbicia” elektron ulega bowiem wyhamowaniu po czym rozpoczyna podróż w kierunku przeciwnego bieguna geomagnetycznego, gdzie cała historia się powtarza. Ziemskie pole magnetyczne umożliwia więc uwięzienie cząstek pomiędzy zwierciadłami magnetycznymi, znajdującymi się w pobliżu biegunów. Taki układ dwóch zwierciadeł nazy-

wa się czasami **butelką magnetyczną**. W efekcie naładowane cząstki przemieszczają się tam i z powrotem pomiędzy biegunami, przy czym dla naszego przykładowego elektronu okres takich oscylacji wynosi kilka sekund.

Pozostaje jeszcze wyjaśnić skąd bierze się powolny dryf cząstek wokół naszej planety, skutkiem czego naładowane cząstki nie poruszają się stale wzdłuż tego samego południka. Ponieważ pod wpływem siły Lorentza cząstki zataczają sporej wielkości okręgi, to raz znajdują się one bliżej, a raz dalej od powierzchni Ziemi. A ponieważ ziemskie pole magnetyczne maleje z wysokością, oznacza to, że tak naprawdę zamiast po okręgach,



Rys. 6. Ruch cząstki naładowanej w obrębie pasa radiacyjnego: a) ruch śrubowy wzdłuż linii pola magnetycznego, b) oscylacyjny ruch pomiędzy biegunami geomagnetycznymi, c) dryf wokół Ziemi

cząstki krążą po bardziej skomplikowanych krzywych. Promień zataczanego przez cząstkę łuku jest bowiem nieco mniejszy kiedy cząstka jest bliżej Ziemi i większy, kiedy cząstka przemieszcza się dalej od powierzchni planety. Tak więc za każdym razem, kiedy elektron oddalony jest od powierzchni globu, przemieszcza się trochę dalej w kierunku wschód-zachód niż w kierunku przeciwnym, kiedy znajduje się bliżej Ziemi. Te minimalne różnice akumulują się stopniowo i prowadzą do tego, że cząstki wędrują w obrębie pasów Van Allena ze wschodu na zachód lub z zachodu na wschód, wykonując co kilka dni pełne okrążenie wokół Ziemi.

Na koniec powróćmy jeszcze do kwestii zorzy polarnej i burz magnetycznych. Co to właściwie jest zorza? Otóż, mimo że zwierciadła magnetyczne bardzo efektywnie odbijają naładowane cząstki zdarza się, że część z nich przedostaje się do atmosfery. Takie rozprężone cząstki zderzając się z atomami w atmosferze pobudzają je do świecenia. Tak więc to, co podziwiamy jako „światła północy”, to świadectwo o „przecieku” szybkich naładowanych cząstek przez ochronną warstwę pasów radiacyjnych. Podczas burz magnetycznych układ linii ziemskiego pola magnetycznego ulega zmianie, a z nim położenie pasów Van Allena. Dlatego sondy kosmiczne i satelity, w normalnych warunkach znajdujące się w bezpiecznym obszarze pomiędzy pasami radiacyjnymi, czasem nagle znajdują się w samym centrum obszaru bombardowanego przez cząstki wiatru słonecznego. Ponieważ prowadzi to do uszkodzeń sprzętu oraz do zakłóceń w komunikacji, konieczne jest ciągłe śledzenie tzw. **pogody kosmicznej**, czyli warunków panujących w przestrzeni kosmicznej otaczającej Ziemię. W tym celu naukowcy zajmują się nieustannym śledzeniem procesów zachodzących na Słońcu, po to by móc przewidzieć wszelkie anomalie i przeciwdziałać z wyprzedzeniem ich potencjalnym skutkom.